文章编号：1000-8241（2015）08-0799-08

大型地下水封石油洞库及微震监测技术应用现状

庄端阳[1] 马克[2] 唐春安[1] 刘安琪[3]
1. 大连理工大学海岸与近海工程国家重点实验室，辽宁大连 116023；
2. 中国科学院力学研究所，北京 100190；3. 中国石油安全环保技术研究院，北京 102206

摘要：目前我国地下水封洞库开发现状形势严峻，在洞库储油过程中，输油、抽油和注水等作业都会诱发岩体微破裂，微震监测技术正逐渐在地下水封洞库的稳定性和安全性评价方面显示出特有的优势。通过分析微地震活动性事件来描述洞库岩体裂缝的二次活动性信息，可以判定洞库岩体的损伤程度及安全状态，进而揭示洞库岩体的变形机制。以中国石油锦州地下水封洞库工程为例，介绍了微震监测技术在地下水封石油洞库中的应用，从而为未来地下水封储油洞库的运营管理提供思路。（图10，参34）

关键词：地下水封洞库；微震监测；岩体裂缝；损伤程度
中图分类号：TE822 文献标识码：A doi：10.6047/j.issn.1000-8241.2015.08.001

Application of microseism monitoring technology in underground water-sealed oil storage caverns

ZHUANG Duanyang[1], MA Ke[2], TANG Chun'an[1], LIU Anqi[3]
1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning, 116023;
2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190;
3. CNPC Research Institute of Safety and Environment Technology, Beijing, 102206

Abstract: The development of underground water-sealed caverns stays in a grim situation in China, since microfractures are induced at rock mass in caverns by oil transportation, oil pumping and water injection during the operation of oil storage in the caverns. Accordingly, the microseism monitoring technology is gradually presenting its unique advantages in evaluating the stability and safety of underground water-sealed caverns. Based on the analysis of micro-seismic activity events, the secondary activity of the fractures are described and the damage degree and safety status of the rock mass are diagnosed, so that the deformation mechanism of the rock mass is revealed. This paper presents the application of microseism monitoring technology in Jinzhou underground water-sealed oil storage cavern of PetroChina, in order to provide the reference for the development and management of future underground water-sealed oil storage caverns. (10 Figures, 34 References)

Key words: underground water-sealed oil storage caverns, microseism monitoring, fractures, damage degree

随着国民经济的飞速发展，我国石油需求量呈几何递增态势。石油作为重要的战略物资被誉为“工业血液”，能够及时应对突发事件，平衡和稳定供求关系，促进国民经济安全快速发展。自1993年开始，我国从石油出口国变为石油进口国，对国际石油资源的依赖性愈来愈强，复杂多变的国际局势使得国际油价剧烈震荡，对国民经济产生巨大影响，为此，战略石油储备显得尤为重要。地下水封储油洞库作为一种重要的石油资源战略储备设施，正在我国沿海等优质稳定性岩性区域进行大规模建设，这对于石油进口量不断增加的中国无疑是一项利国利民的重要举措[1-3]。

应用微震监测技术研究岩体内部的微破坏进而评价岩体损伤程度和质量将成为建设大型水封洞库的必要环节。针对地下水封洞库岩体微破裂的关键科学问题，基于对洞库整体特殊结构的认识，以工程地质学和岩石力学为指导，运用地质调查和现场微震监测相结合的方法，获得地下水封洞库建造时期的围岩稳定性变化规律，进而为综合评价洞库“水封效果”提供客观依据。将微震监测应用于石油水封洞库，既能够使石油水封洞库的相关研究内容在很大程度上得到丰富，

网络出版时间：2015-8-14 11:19:00 网络出版地址：http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1093.TE.20150814.1119.001.html

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

又对我国地下水封石油洞库工程建设具有重要的理论和现实意义。

1 石油水封洞库发展现状

国际上，早在二战时期就提出了地下水封储油洞库的方法：通过对地下岩体进行检测分析，在特定深度挖出具有一定容积的洞室，利用稳定的地下水产生的水封作用，将洞室中的油或液态气体进行密封储存，其占地面积小、投资花费少、安全性高、战备要求实用性强。目前，该方法仍然是国际石油战略储备的重要方式，瑞典、日本、韩国等都有成功的建造案例[4-6]。

现阶段，我国战略石油储备迫在眉睫的工作任务是：建设若干大型地下水封石油储备洞库，国家发改委已经批准我国主要石化企业开展相关的试点工作。中国石油天然气股份有限公司正在建设广东惠州、辽宁锦州地下水封洞库，中国石油化工集团公司正在建设山东黄岛、广东湛江地下水封洞库[7]。

马峰等[8]运用 DFN 对洞库区岩体进行三维裂隙模拟，得出连通性分布图和导水系数分布图，揭示洞库岩体裂隙水渗流的本质，从而为运营期间涌水量评价提供依据。于崇等[9-10]依据辽宁大连地下石油储备库的实际特点，采用 3DEC 三维节理网络模型，统计模型中各组节理的个数及产状信息，应用渗流模型反演库区的初始渗流场，其研究成果不仅为洞库水幕设计提供了较合理的初始渗流场条件，而且能够定量评价整体洞室群的稳定性。刘琦等[11]针对建设地下水封油库水文地质条件和基本原理，提出了选择库址时工程中关于水文地质问题的认识，并提出了相关建议。张子新等[12]在块体理论的指导下，采用相应的赤平解析法，研究了锦州地下水封油库的围岩稳定性，运用完善的赤平解析法对锦州地下水封油库不同情况下的围岩稳定性问题进行了分析，得出洞室内油压有利于块体稳定，而地下水会增大块体失稳的结论。宋琨等[13]以围岩稳定性为评价指标，通过正交试验设计的方法对黄岛地下水封洞库的工程布置进行了优化研究。杨典森等[14]根据龙滩水电站地下洞室群的布局，利用 FLAC3D 对同向开挖和反向开挖两种群洞开挖顺序进行数值模拟计算，研究了不同开挖方案下的洞库围岩稳定性。时洪斌等[15]通过 FLAC3D 数值模拟软件，对黄岛水封洞库的水封条件和围岩稳定性进行了研究，分析了有、无渗流场条件下的开挖和运营期的储油模拟，得出人工水幕系统可以实现完全水封，且储库围岩稳定的结论。杨明举等[16-17]通过数值模拟建立了针对我国第一座水封式地下储气洞库（汕头 LPG）内存在的应力场、渗流场及储气场三者之间通过相互作用而形成的弹塑性变分原理，并据此对弹性、弹塑性介质耦合等有限元方程式进行了成功推导，验证了其可行性和合理性。陈奇等[18]以山东黄岛 LPG 地下洞库为例，采用 FLAC 软件对洞库围岩的应力和位移特征进行分析，指出岩体完整性是洞库稳定性的核心问题。连建发等[19-20]深入研究锦州大型地下水封 LPG 洞库岩体完整性参数与超声波波速的关系，并运用数值模拟评价地下水封 LPG 洞库围岩的稳定性。王芝银等[21]根据水封储油洞库的工程特点，利用 FLAC3D 对储库洞群中各洞室的开挖施工顺序进行了数值计算。分析了关键位置、地表变形以及应力场和位移场的分布规律，评价了洞室的长期安全稳定性。以分形理论为基础，王者超等[22]主要研究了地下水封石油储备洞库的岩体完整性、岩体纵波波速及岩体渗透性等方面的内容。

然而，我国对地下水封石油洞库建造技术的了解和掌握尚显不足，实践工程建设中以“拿来主义”居多，出现过诸多问题，例如：已建成的黄岛小型地下储油洞库（15×10^4 m^3）因原油泄漏、运营成本高等问题而最终废弃，未能显示出石油水封洞库所特有的优势。由于地下水封洞库对于地质条件有着极其严格的选择性和依赖性，因此决定了建造时不能完全照搬国外经验。现有的宁波、汕头、黄岛、龙泽等 LPG 库均完全依靠国外公司的技术建造完成，但是，在工程建设过程中发现，仍有许多技术难题亟需克服，而开展地下水封洞库的稳定性研究具有重要的工程意义。地下水封储油洞库主要采用高边墙及容积和跨度较大的地下洞室结构，使该结构长期处于动态地下水环境中，可以有效阻止油气泄漏。然而，处于水-岩-油这种多相多场相互耦合作用下的洞室群岩体，发生二次微破裂的几率倍增，其破坏程度远远大于原岩的渗透率，很难防止储油库发生泄漏。

无论是洞库的密闭性还是围岩体的稳定性，归根到底都是岩体质量问题，岩体质量问题则是地下水封洞库“围岩稳定性”和“水封效果”两个关键基础科学问题的核心。评价岩体质量的指标繁多，标准不一，且人为因素较大。

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2 微震监测技术

2.1 基本原理

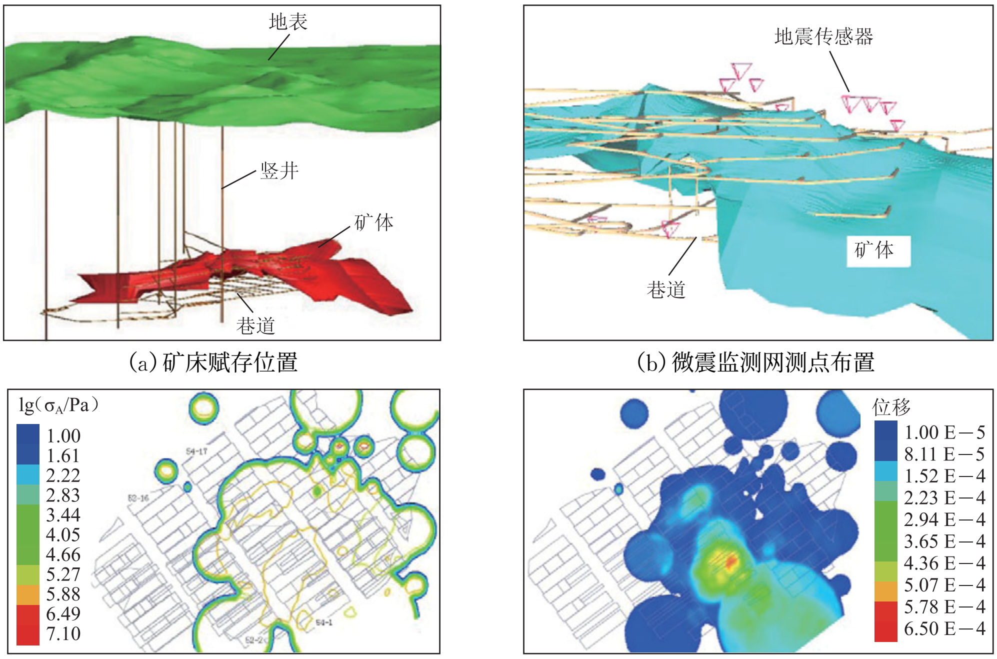
张银平[23]研究发现，在岩体开挖过程中及受到施工扰动后，岩体的稳定性可以通过岩体本身发射的弹性波进行有效监测。其实，岩石类材料在外界应力作用下，当能量积聚到某一临界值时，就伴随有弹性波或应力波在周围岩体快速释放和传播，该现象在地质上称为微（地）震。通过监测到的微破裂信号来确定微破裂岩体所发生的时刻和位置，根据岩石破裂时的时空分布规律可以推断其宏观破裂的发展趋势，判断潜在的灾害活动规律，从而实现灾害风险的预警预报。目前，随着监测系统硬件、软件的不断发展和完善，微震监测技术在国内矿山、水利水电等领域得到广泛应用。

2.2 微震监测技术的工程应用

2.2.1 矿山

近年来，微震监测技术被越来越广泛地应用于采矿领域，应用效果显著，因而受到国内外相关研究机构的认可与重视。国内研究人员通过对从国外引进的先进微震监测系统开展深入研究，在不同领域的工程应用中进行创新和改进，取得了诸多研究成果。

唐礼忠等[24]在冬瓜山铜矿建立了微震监测系统，通过对岩层活动进行连续监测，对岩爆进行实时预报（图 1），对矿山地震信号进行识别，分析了矿山地震活动规律，实现了地震学定量分析和可视化解释功能，完成了多重聚类和时间序列分析。



（a）矿床赋存位置　（b）微震监测网测点布置

（c）2006 年 8 月 1 日—9 月 30 日不同水平面视应力分布　（d）2006 年 8 月 1 日—9 月 30 日不同水平面位移分布

图 1　冬瓜山铜矿微震活动性仿真图

刘超[25]基于煤矿开采沉陷学理论，结合淮南矿区新庄孜煤矿工程，通过建立的微震监测系统对覆岩采动裂隙的分布特征进行分析，结果显示：该裂缝呈现不规则的、闭合的圆柱形横卧体的分布状态，很好地解释了覆岩采动裂隙的 O 形圈基本原理（图 2）。

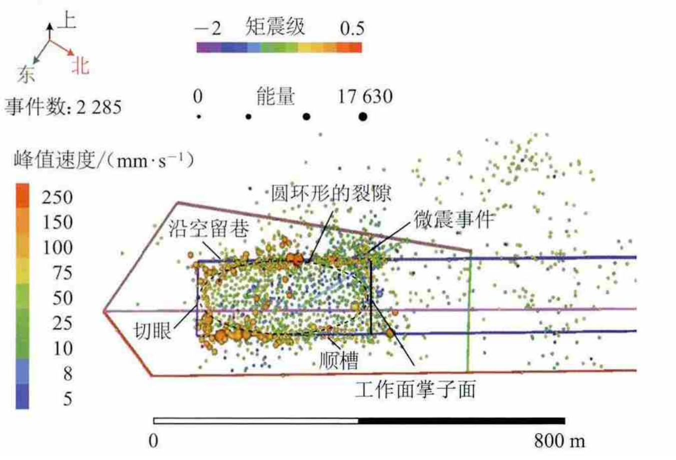


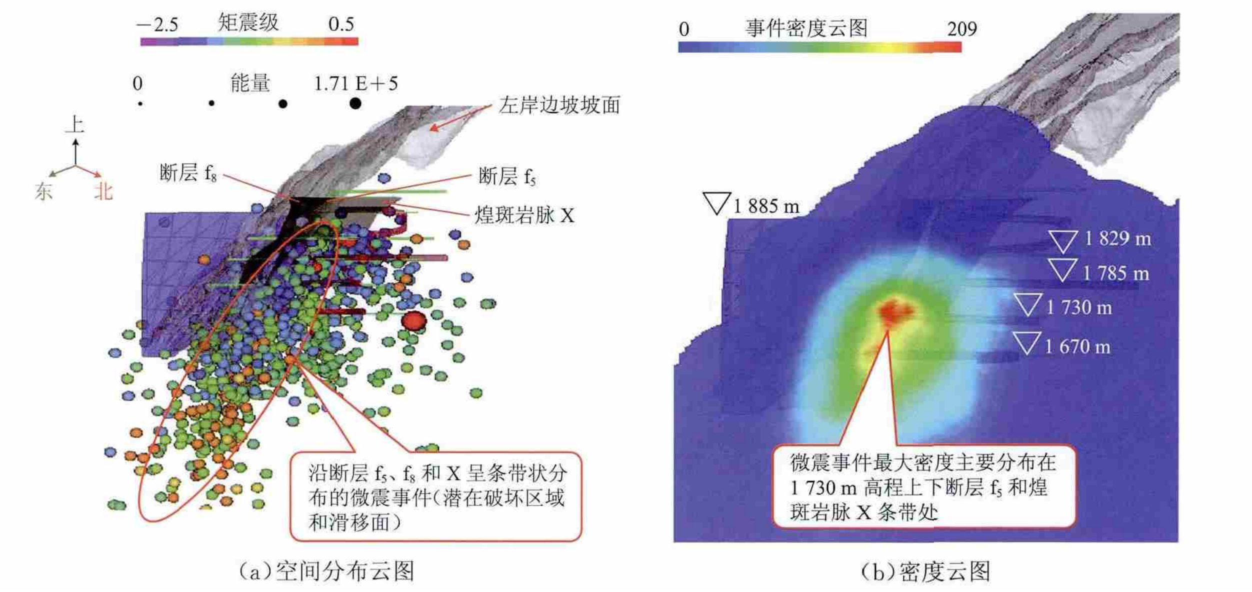
图 2　淮南矿区新庄孜煤矿覆岩采动裂隙场微震活动分布特征

2.2.2 水利水电

随着我国对西南部地区水电资源开发重视程度的不断加大及水电资源发展速度的加快，越来越多的大型水电工程面临高陡岩质边坡的安全稳定性问题。因此，有效控制和掌握高陡岩质边坡的安全稳定性已经成为水利水电工程应该考虑的首要问题。

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

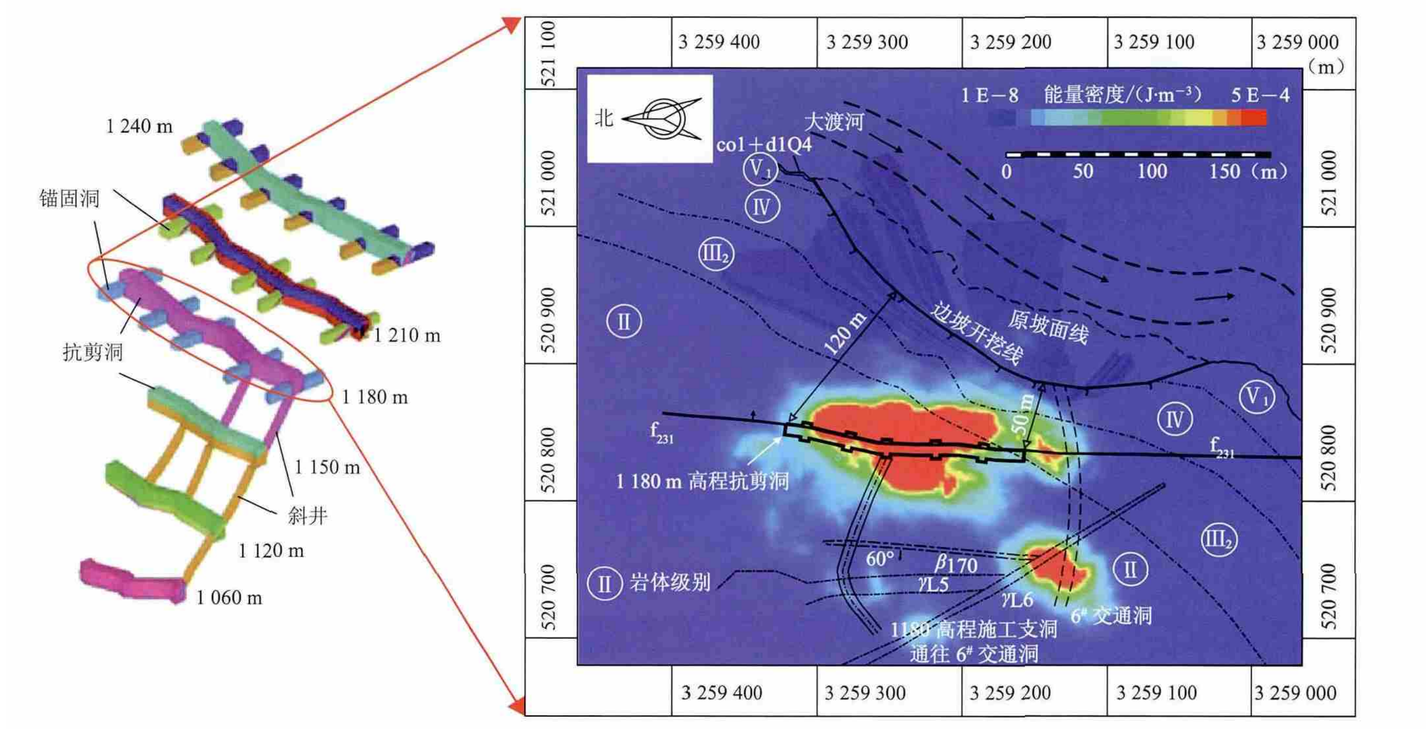
通过对锦屏一级水电站工程为背景，大坝左岸边坡进行监测，徐奴文[26]构建了中国第一套高陡岩质边坡安全稳定监测系统，实现了对边坡稳定性 24 h 连续监测和分析。该系统主要用于大型水电站，通过对微震实时监测及预警，实现对高陡岩质边坡的稳定性监测。其不仅证实了微震监测的可行性，使常规监测结果和施工动态得到正确的反映，而且体现了微震监测技术作为一种三维空间、实时"体"监测技术的优越性（图 3）。



（a）空间分布云图　（b）密度云图

图 3　微震事件空间分布规律及其密度云图

马克等[27]根据揭示的特殊坡体结构承载特征及边坡渐进破坏演化机理，通过微震监测结果研究抗剪洞加固后边坡的变形模式，揭示了边坡破坏过程中滑坡与抗剪洞相互作用机理及变形协调分担机制，验证了抗剪洞滑坡防治结构是能够有效控制边坡渐进破坏演化过程的加固措施，可以为类似地质条件的大型水利水电工程高陡边坡加固方案的选取与防治提供理论支撑（图 4）。



（a）边坡抗剪洞补助　（b）1 180 m 高程抗剪洞处微震能量密度

图 4　微震监测抗剪洞加固效果图

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2.2.3　水力压裂

目前，水力压裂是低渗透油气藏增产改造的重要措施，微震监测技术在水力压裂工程中具有不可或缺的重要作用。水力压裂的主要原理：在水力压力作用下，井筒压力迅速升高，直至超过岩石的最大抗压强度而破坏，形成一定的岩石裂缝，随着裂缝的不断扩展，会产生一系列微震波，并向周围传播和扩散，因而可以利用微震波监测水力压裂的整个过程，此外，微震震源的位置能够通过波长确定，从而可以准确计算裂缝的缝型、分布方位、高度等相关参数（图 5），总结压裂形成新裂缝的机制以及评价压裂液性能和压裂效果，并根据多井点监测的地下裂缝网络，及时进行井网调整，避免油、水井连通，发生水淹、水窜，为继续开展转向压裂施工和监测提供参考[28-33]。

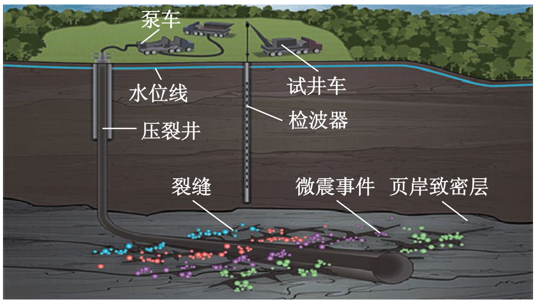


图 5　微震监测在石油开采水力压裂中的应用示意图

3　水封洞库微震监测实例

如何利用微震监测技术对石油水封洞库的微破裂进行有效监测，提前预测判别岩体潜在的失稳区域和围岩变形损伤的程度，从而正确判断水封效果和围岩稳定性，国内外尚缺乏相关研究。开展地下水封洞库的微震监测，进而分析岩体力学行为特征，无疑对全面评价地下水封洞库的稳定性具有重要意义。

3.1　工程概况

拟建锦州地下水封洞库，位于海拔 15.3～43.0 m 辽西山地的东南边缘。储油洞室洞底标高 －80 m，洞顶标高 －56 m；由东西向平行布置 4 组 8 个储油洞室，尺寸为 934 m（长）×19 m（宽）×24 m（高）；设计总容量 300×10^4 m^3，其中包括水幕系统（水幕巷道、水幕孔）及施工巷道等设施。在储油洞室洞顶上方 24 m 处设置水幕系统，由两部分组成[34]：①南北向和东西向分别布设的 5 条水幕巷道（底标高 －32 m），各超出储油洞室范围 20 m，6 条南北向布置的水幕巷道超出储油洞室范围 14.5 m。②与水幕巷道相连接的水平和垂直水幕孔，水平水幕孔按东西向布置，直径 100 mm，孔间间距 10 m；垂直水幕孔直径 100 mm，孔间间距 20 m，孔深 58 m，底标高 －90 m（图 6）。

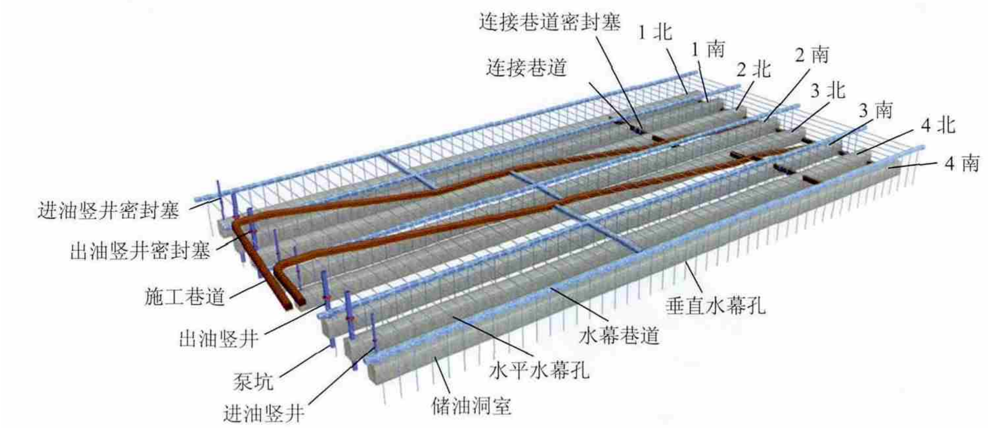


图 6　锦州地下水封石油洞库示意图

3.2　水封洞库微震监测系统

矿山微震监测系统是该实例选用的对水封洞库微震进行监测的主要系统，由加拿大 ESG 公司生产，包括对数字信号进行采集的 Paladin 系统，对数字信号进行处理的 Hyperion 系统，此外，加速度传感器也是该系统的重要组成部分。6 通道微震监测系统覆盖储油洞室 1 北、1 南、水幕巷道 1 和水幕巷道 2 构建成的 300 m×200 m×100 m 区域范围，Paladin 系统在 0～20 000 Hz 频率范围内对数字信号进行采集，而且主要通过阈值触发。单轴加速度计采集频率范围为 50～5 000 Hz，灵敏度为 30 V/g，阵列式分布在水幕巷道中，对水封洞库在开挖过程中由于卸荷而引起的微破裂事件进行连续 24 h 实时监测，及时有效地获得微震事件产生的时空性、动态性数据等震源参数信息（图 7）。通过阈值设定、滤波处理、带宽检波等方法排除背景噪音事件，识别并存储完整波形与波谱分析图。

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

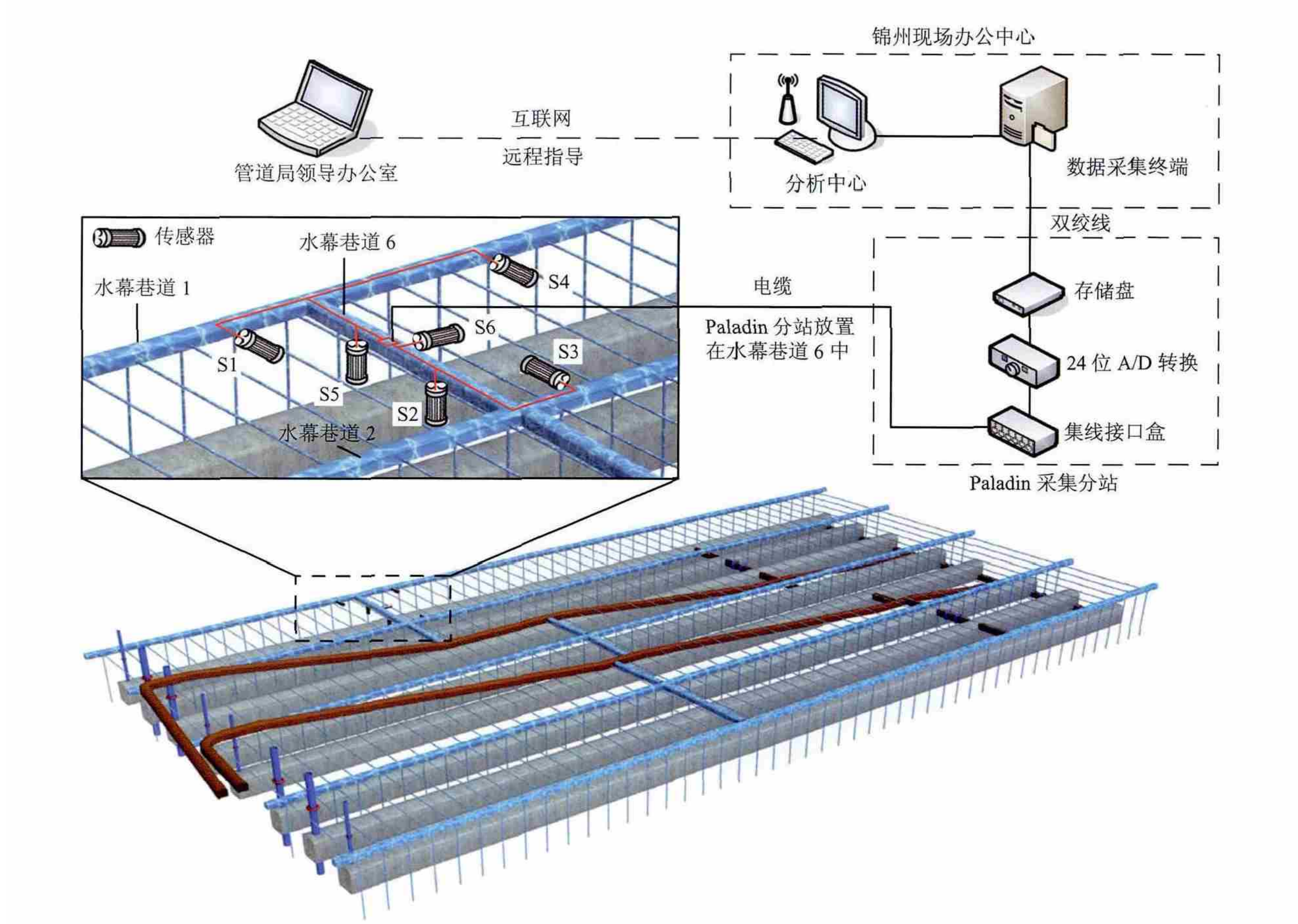


图 7　微震监测系统网络拓扑图

在开挖扰动过程中，水封洞库的微震活动主要呈两个条带集中分布（圆球代表微震事件，球体颜色代表矩震级，大小代表微震能量）：一条近水平分布于水幕巷道 6（2+63 里程）以东 30 m 附近区域；另一条垂直分布于储油洞室 1 北与 1 南之间 2+40～2+60 里程区域，在此区域内微震事件聚集密度最大（图 8）。

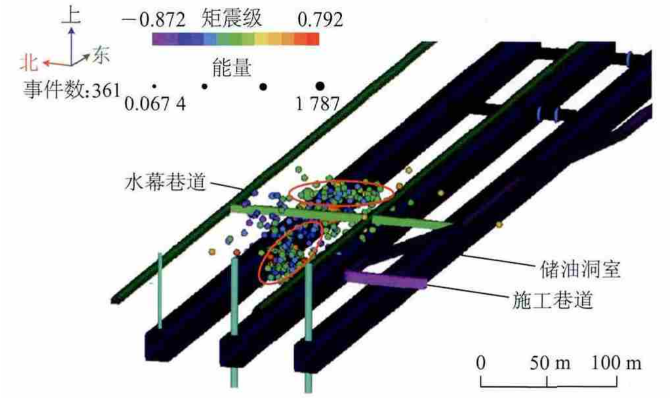
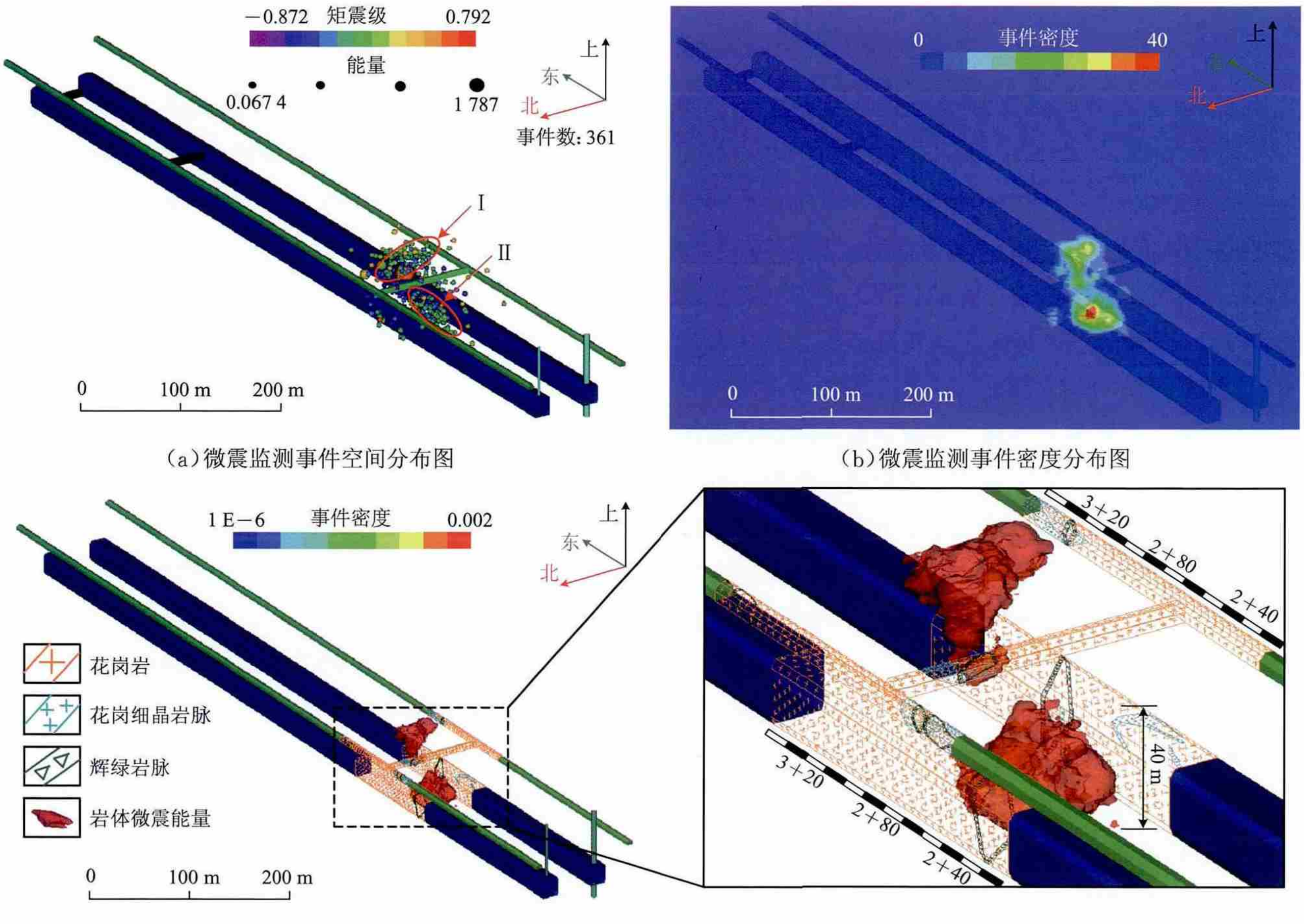


图 8　微震监测事件空间分布图

当储油洞室 1 北中层开挖至 1+52 里程，储油洞室围岩微破裂聚集呈现两条带状分布（图 9a）：一条位于水幕巷道 2 南侧 3+10 里程附近区域，近水平分布（图 9a 中Ⅰ）；另一条位于储油洞室 1 北与 1 南之间 2+40～2+60 里程区域（图 9a 中Ⅱ）。微震事件密度亦聚集在这两条带状区域内，并且在储油洞室 1 北 2+40～2+60 里程南侧边墙区域围岩微破裂密度最大（图 9b）。此区域陆续产生的"塌腔"和"落石"等局部不稳定现象是开挖强卸荷作用下岩体高能量聚集、释放和转移导致该处围岩微破裂集聚并转化为局部失稳的结果。根据监测期间锦州地下水封洞库研究区域内开挖卸荷作用下围岩微震能量释放密度分布情况（图 9c，图中将研究区域内的辉绿岩脉、花岗细晶岩脉与能量释放密度包络区域放置在一起），能量释放集中区域与微震事件空间分布类似，呈现两个集中区域分布。储油洞室 1 北和 1 南 2+40～2+80 里程区域内围岩微震能量释放较集中，竖直方向从洞室底部向上延伸近 40 m。该能量释放集中区域局部延伸到 1 南洞室 2+55 里程附近的花岗细晶岩脉，但整体上与围岩中辉绿岩脉等的展布（240°∠85°）情况较为一致，说明开挖卸荷导致围岩沿辉绿岩脉能量释放集中，从而导致储油洞室 1 北中层 2+45～2+55 里程附近的局部不稳定现象。水幕巷道 2 北侧 3+10 里程附近亦是能量释放集中区域，分析其与辉绿岩脉和花岗细晶岩

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a)微震监测事件空间分布图　(b)微震监测事件密度分布图

(c)微震事件能量密度图

图 9　研究区域内微震事件空间分布规律(2014 年 7 月 28 日—2014 年 8 月 26 日)

脉发育的关系,发现该区域西侧(靠近水幕巷道 6 一侧)与辉绿岩脉发育较为一致,而其另一侧呈现与水幕巷道 6 平行分布,主要是因为 水幕巷道 2 北侧边墙 3+07 与 3+27 里程水幕孔注水诱发水幕巷道围岩微破裂,能量释放比较集中。此外,两个围岩能量释放集中区域呈现贯通趋势,为洞室开挖卸荷过程中的潜在危险区域,需要密切关注其能量释放规律,把握其发展趋势,为工程设计和施工提供参考。

微震事件分布条带自上而下延伸至储油洞库 1 北南侧边墙 2+45~2+55 里程附近。地质勘探揭示 储油洞库 1 北南侧边墙 2+45~2+55 里程分布着辉绿岩脉、花岗细晶岩脉以及玢岩等岩脉。由于热液蚀变作用,岩脉附近的花岗岩一般较为破碎,完整性较差(图 10)。显然,在洞库强卸荷开挖作用下,洞库岩脉等软弱结构面损伤加剧。可以推测 在长期地质构造应力作用下,这些花岗岩发育的缓倾角压扭小断层和节理裂隙,往往是地下水流动的“ 通道 ”,可为后期有针对性地评估水封洞库的“ 水封 ”效果提供参考依据。

图 10　1 北上层南侧边墙 2+80 里程(摄于 2014 年 7 月 29 日)

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

4　结论

通过分析微震监测技术在矿业、水利水电和石油水力压裂领域的应用现状，深入认识当前大型地下水封石油洞库监测技术面临的问题，依托国家重大科技项目——中国石油锦州地下水封洞库工程，采用微震监测技术，探讨强卸荷施工扰动作用下洞室微震活动性特征及其破坏机理，为未来分析和研究复杂环境下石油洞库的稳定性奠定基础。主要结论如下：

(1)通过对锦州大型地下水封石油洞库进行微震监测，获取了大量岩质洞室渐进破裂诱发失稳过程中微震活动的数字化信息。通过对各种影响微震活动性的内外相关因素及其之间的相互联系进行深层次分析，识别和圈定了洞室内部已知断层的活化区域，并揭示其微震活动演化机理。

(2)探究了洞库局部失稳与其微震活动规律之间的关系，可以通过微震监测结果对洞室在实际施工过程中可能出现的某些不正常情况进行透彻分析。通过研究原岩以及背景应力场的积累、释放等在扰动环境条件下的基本规律，可以对洞室岩体发生变形的主要发展趋势进行有效预测。

参考文献：

[1] 张金龙，冯树荣，许卫. 我国地下水封石油洞库研究现状及发展动向[J]. 水力发电，2013，39(11)：80-84.

[2] 金芳，董小亮. 建立和完善我国石油战略储备的探析[J]. 中外能源，2008，13(4)15-19.

[3] 张超，马俊，张哲. 论我国石油战略储备[J]. 军事经济研究，2005(12)：13-15.

[4] Royal Swedish Academy of Engineering Sciences. Going underground[R]. Sweden：IVA，1988.

[5] 杜国敏，耿晓梅，徐宝华. 国外地下水封岩洞石油库的建设与发展[J]. 油气储运，2006，25(4)：5-6.

[6] LEE C I，SONG J J. Rock engineering in underground energy storage in Korea[J]. Tunnellingand Underground Space Technology，2003，18(5)：467-483.

[7] 宋琨. 花岗片麻岩体渗透特性及水封条件下洞库围岩稳定性研究[D]. 北京：中国地质大学，2012.

[8] 马峰，白凤怀，陈刚，等. 黄岛地下水封洞库库区三维裂隙网络模拟[J]. 岩石力学与工程学报，2011，30(增刊2)：3422-3427.

[9] 于崇，夏祥，周青春. 基于离散单元法的节理岩体支护分析[J]. 岩石力学与工程学报，2013，32(增刊2)：3246-3257.

[10] 于崇，李海波，李国文. 大连地下石油储备库初始渗流场数值反演[J]. 岩石力学与工程学报，2010，29(3)：609-616.

[11] 刘琦，卢耀如，张凤娥. 地下水封储油库库址的水文地质工程地质问题[J]. 水文地质工程地质，2008，35(4)：1-5.

[12] 张子新，廖一蕾. 基于块体理论赤平解析法的地下水封油库围岩稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报，2010，29(7)：1339-1347.

[13] 宋琨，晏鄂川，杨举，等. 基于正交设计的地下水封洞库群优化[J]. 岩土力学，2011，32(11)：3503-3507.

[14] 杨典森，李术才，陈卫忠，等. 龙滩水电站地下洞室群施工顺序及稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报，2003，22(1)：2254-2258.

[15] 时洪斌，刘保国. 水封式地下储油洞库人工水幕设计及渗流量分析[J]. 岩土工程学报，2010，32(1)：131-137.

[16] 杨明举，关宝树. 地下水封储气洞库原理及数值模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报，2001，20(3)：301-305.

[17] 杨明举，关宝树. 地下水封裸洞储存LPG耦合问题的变分原理及应用[J]. 岩石力学与工程学报，2003，22(4)：515-520.

[18] 陈奇，滇乃齐，连建发，等. 液化石油气地下洞库围岩稳定性分析——以山东某地实际工程为例[J]. 煤田地质与勘探，2002，30(3)：33-36.

[19] 彭振华，连建发. 锦州拟建LPG洞库场地岩体的质量评价[J]. 西部探矿工程，2004，16(5)：127-128.

[20] 连建发，慎乃齐，张杰坤. 基于可拓方法的地下工程围岩评价研究[J]. 岩石力学与工程学报，2004，23(9)：1450-1453.

[21] 王芝银，李云鹏，郭书太，等. 大型地下储油洞粘弹性稳定性分析[J]. 岩土力学，2005，26(11)：1706-1710.

[22] 王者超，李术才，林春金，等. 大型地下水封石油洞库围岩完整性、变形和稳定性分析[J]. 山东大学学报(工学版)，2011，41(3)：113-125.

[23] 张银平. 岩体声发射与微震监测定位技术及其应用[J]. 工程爆破，2002，8(1)：58-61.

[24] 唐礼忠，潘长良，杨承祥，等. 冬瓜山铜矿微震监测系统建立及应用研究[J]. 金属矿山，2006，6(3)：273-277.

[25] 刘超. 采动煤岩瓦斯动力灾害致灾机理及微震预警方法研究[D]. 大连：大连理工大学，2011.

[26] 徐奴文. 高陡岩质边坡微震监测与稳定性分析研究[D]. 大连：大连理工大学，2011.

(下转第862页)

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[7] STOESSEL R, KROHN N, PFLEIDERER K, et al. Air-coupled ultrasound inspection of various materials[J]. Ultrasonics, 2002, 40(8):159-163.

[8] GOMEZ T E, ALBAREDA A, PEREZ R, et al. High sensitive piezoelectric transducers for NDE air borne applications[C]. Puerto Rico:IEEE Ultrasonics Symposium, 2000.

[9] GOMEZ TE, MONTERO F. Bridging the gap of impedance mismatch between air and solid materials[C]. Puerto Rico:IEEE Ultrasonics Symposium, 2000.

[10] 崔尧尧. 基于声传感器阵列的管道内检测器追踪定位系统关键技术研究[D]. 天津:天津大学, 2012 年.

[11] 刘香. 海底管道超声波检测装置的研究与设计[D]. 济南:山东大学, 2011 年.

[12] 崔治. 小波分析在超声检测信号处理中的应用研究[D]. 长沙:湖南大学, 2012 年.

[13] 吴鑫, 谢基龙, 石坤, 等. 脉冲涡流参数对金属测厚影响的仿真分析[J]. 北京交通大学学报, 2012, 36(1):122-126.

[14] 罗元国, 王宝良, 黄志尧, 等. 空气耦合式超声波无损检测技术的发展及展望[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(8):742-744.

[15] BLOMME E, BULCAEN D, DECLERCQ F. Air-coupled ultrasonic NDE:experiments in the frequency range 750 kHz-2 MHz[J]. NDT & E International, 2002, 35(7):417-426.

[16] 赵丹铮. 基于超声波的管道防腐层缺陷检测方法的研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2015.

(收稿日期:2014-05-27;修回日期:2015-04-14;编辑:潘红丽)

基金项目:国家科技支撑计划课题"西气东输二线管道工程关键技术研究", 2008BAB30B05。

作者简介:杨金生, 工程师, 1983 年生, 2009 年硕士毕业于天津科技大学检测技术与自动化装置专业, 现主要从事管道检测技术研究及管道检测器的开发研制工作。

YANG Jinsheng, MS.D, engineer, born in 1983, graduated from Tianjin University of Science and Technology, detection technology and automatic equipment, in 2009, engaged in the research of pipeline inspection technology and the development of pipeline detector.

Tel: 0316-2071672, Email: jameson.young@163.com

(上接第 806 页)

[27] 马克, 唐春安, 李连崇, 等. 基于微震监测与数值模拟的大岗山右岸边坡抗剪洞加固效果分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(6):1239-1247.

[28] 姜福兴, 尹永明, 朱权洁, 等. 基于微震监测的千米深井厚煤层综放面支架围岩关系研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(2):167-174.

[29] 张寅, 韩荣军. 沿煤高压水力压裂试验与效果[J]. 煤矿开采, 2010, 15(2):67-96.

[30] 姜福兴, 郭信山, 黄广伟, 等. 煤层超高压定点水力压裂防冲试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(3):527-531.

[31] 金维浚, 张衡, 刘伟, 等. 微地震监测技术及应用[J]. 地震, 2013, 33(4):85-95.

[32] 刘振武, 撒利明, 巫芙蓉, 等. 中国石油集团非常规油气微地震监测技术现状及发展方向[J]. 石油地球物理勘探, 2013, 48(5):844-853.

[33] 王爱国. 微地震监测与模拟技术在裂缝研究中的应用[D]. 青岛:中国石油大学(华东), 2006.

[34] 辛继勇, 许卫. 某地下水封洞库工程水幕系统设计初步研究[J]. 长沙理工大学学报, 2014, 11(4):78-82.

(收稿日期:2015-05-13;修回日期:2015-08-05;编辑:关中原)

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)资助项目"重大岩体工程灾害模拟、软件及预警方法基础研究", 2014CB047100;国家自然科学基金资助项目"岩石三维表面裂纹扩展贯通机制的物理试验与数值模拟研究", 51274053。

作者简介:庄端阳, 在读博士生, 1990 年生, 2012 年毕业于吉林大学土木工程专业, 现主要从事水封洞库微震监测及其稳定性的研究工作。

ZHUANG Duanyang, Ph.D candidate, born in 1990, graduated from Jilin University, civil engineering, in 2012, engaged in the research of microseismic monitoring and stability of water-sealed oil storage caverns.

Tel: 15382171233, Email: zhuangdy@mail.dlut.edu.cn

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net